

機械学習による熱水鉱床生成に関連した火成岩類の化学組成の相違

谷口卓也*・小池克明*

Differences in Chemical Compositions of Igneous Rocks Related to Generation of Hydrothermal Deposits by Machine Learning Methods

Takuya Taniguchi* and Katsuaki Koike*

*京都大学大学院工学研究科都市社会学専攻 Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan. E-mail: taniguchi.takuya.22i@st.kyoto-u.ac.jp (Taniguchi)

キーワード: 鉱化花崗岩類, 不適合元素, 熱水鉱床, 斑岩銅鉱床, 機械学習

Key words: Mineralized granitoids, Incompatible element, Hydrothermal deposit, Porphyry copper deposit, Machine learning

1. はじめに

世界的な金属資源需要の増加 (Watari *et al.*, 2021) に伴い, 多数の金属鉱床が分布している環太平洋ベルト上の国々において, 新たな金属鉱床の探査・開発は資源工学における喫緊の課題となっている. 日本に分布する金属鉱床の多くは熱水鉱床であり, その形成メカニズムの解明は国内資源探査戦略において重要である. 一方, 中央アンデス地方のペルーおよびチリは世界有数の銅生産地域であり, 斑岩銅鉱床を中心に世界の銅生産量の約 40%を占める重要な供給拠点である (Selman *et al.*, 2023).

熱水鉱床は多くの場合, 火成岩を伴うマグマ活動により形成されるが, 日本列島に広く分布する花崗岩類や中央アンデスに分布する安山岩類の中には, 鉱床を伴わないものも多数存在する. この差異を支配する地球化学的因子を特定することは, 鉱床探査精度の向上において不可欠である.

これまで, 日本の特定地域や鉱床周辺に分布する花崗岩類の化学組成については多くの研究が報告されている (例えば石原, 2002). また, 中央アンデスにおいても, 特定の斑岩銅鉱床に関連する火成岩の地球化学的特徴に関する研究も多い (Kay *et al.*, 2013). しかし, 地球化学データベース解析に基づき, 鉱床形成との関連性を機械学習によって網羅的に比較検討した研究は比較的限られている.

そこで本研究では, 岩石化学組成データベースを用いて, 日本の花崗岩類および中央アンデスの安山岩類の化学組成を機械学習によって網羅的に解析し, 鉱化作用をもたらした火成岩類の地球化学的特徴の差異を明らかにすることを目的とする.

2. 研究方法

2.1 鉱床・岩石データ統合と鉱化/不毛の分類

岩石化学組成データベースである GEOROC および DODAI database から, 日本の花崗岩類および中央アンデスの安山岩類データを抽出し, それぞれ熱水鉱脈・スカルン鉱床および斑岩銅鉱床の位置情報と GIS 上で統合した. 鉱床からの距離に基づき, 日本の花崗岩類では 10 km 以内,

中央アンデスの安山岩類では 20 km 以内を鉱化, それ以上を不毛岩類として分類した.

2.2 機械学習解析

鉱化/不毛岩類の化学組成の差異を明らかにするため, 化学組成データに対して教師あり機械学習法である Random Forest, AdaBoost, 勾配ブースティング決定木 (GBDT) を適用した. さらに, 元素濃度比の網羅的探索をロジスティック回帰モデルに基づいて行い, 鉱化判別に有効な元素比を抽出した.

3. 日本の花崗岩類解析の結果と考察

3.1 機械学習の結果

主要元素の酸化物 (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5) と不適合元素 (Cs, Rb, Ba, Th, U, Nb, Ta, La, Ce, Sr, Hf, Zr, Y) に注目し, 花崗岩類データセットから抽出後, 前処理として検出限界値処理, 欠損値・外れ値除去を施した後, 合成オーバーサンプリングを訓練データに適応させることで各機械学習を行った. 本研究の機械学習で最も正解率が高かった手法は GBDT であり, これによる鉱化と不毛花崗岩類の分類に寄与した割合を示す重要度を第 1 図にまとめる. 3つの機械学習において, 特徴的な重要度は異なっていたが, 共通して U の重要度が高いという傾向を示した. U は熱水によって錯イオンの形で容易に輸送・沈殿する元素という特徴を持つため, U を含む熱水活動の影響が鉱化/不毛花崗岩類において表れていると考えられる.

3.2 元素比結果

機械学習と同様のデータ処理を実施し, ロジスティック回帰モデルを用いて, 最も顕著な特徴を示す元素濃度比を抽出した結果を第 2 図に示す. 全ての元素濃度比の組み合わせを網羅的に検討した結果, La/Nb と Rb/U の関連グラフにおいて, Rb/U が 25~50 の範囲で鉱化/不毛花崗岩類を明瞭に区別できることが明らかになった. Rb と U はいずれも花崗岩類中に取り込まれにくく, 高 SiO_2 岩に濃集する不適合元素としての性質を有するため, マグマ分化作用の進行度が鉱化/不毛花

崗岩類の判別指標となる可能性が示唆された。

4. 中央アンデスの安山岩類解析の結果と考察

4.1 機械学習の結果

日本の花崗岩類解析と同様の前処理を中央アンデスの安山岩類データセットに適用し、機械学習解析を行った。最も高い分類精度を示した GBDT の特徴量重要度を第 3 図に示す。3 つの機械学習において、特徴的な重要度は異なっていたが、共通して Nb が高い重要度を示した。Nb は高電荷高電場強度元素 (HFSE) であり、沈み込み帯環境ではスラブ由来熱水流体に取り込まれにくく、ルチルやチタン石などの残留鉱物に保持されやすいため、Nb の枯渇が顕著に現れることが多い (Foley *et al.*, 2000)。よって、鉍化安山岩類は Nb に乏しい地球化学的特徴を有することが示唆される。

4.2 元素比結果

機械学習と同様のデータ処理を実施し、ロジスティック回帰モデルを用いて、最も顕著な特徴を示す元素濃度比を抽出した結果を第 4 図に示す。全ての元素濃度比の組み合わせを網羅的に検討した結果、Sr/Hf と Y/Nb の関連グラフにおいて、鉍化/不毛安山岩類を明瞭に区別できることが明らかになった。Y/Nb は島弧マグマの Nb 欠乏の程度を反映する指標として用いられており (Pearce and Cann, 1973)、高い Y/Nb 比は、沈み込み帯深部における Nb を保持する鉱物の影響を反映している可能性があり、鉍床形成に必要な熱水活動との関連を示唆する。

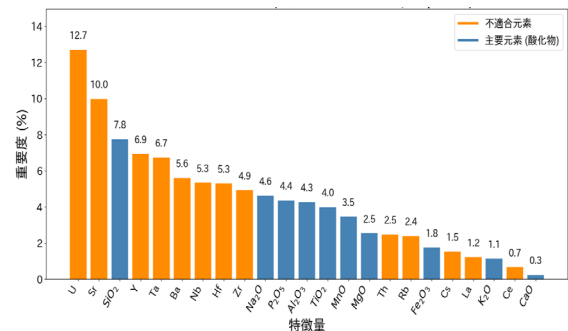
5. まとめ

日本の花崗岩類および中央アンデスの安山岩類に対して機械学習およびロジスティック回帰モデルを適用した結果、鉍化/不毛岩の識別に有効な地球化学的特徴が抽出された。日本の花崗岩類では U および La/Nb-Rb/U 比が重要な識別指標であることがわかり、U の熱水移動性とマグマ分化過程が鉍床形成の指標となる可能性が示唆された。一方、中央アンデスの安山岩類では Nb および Y/Nb-Sr/Hf が高い識別性を示し、沈み込み帯深部における Nb 保持鉱物の影響と鉍床形成に関与する熱水活動との関連が示唆された。これらの結果は、機械学習を用いた広域地球化学解析が、鉍床生成要因の解明に有効な手法であることを示している。

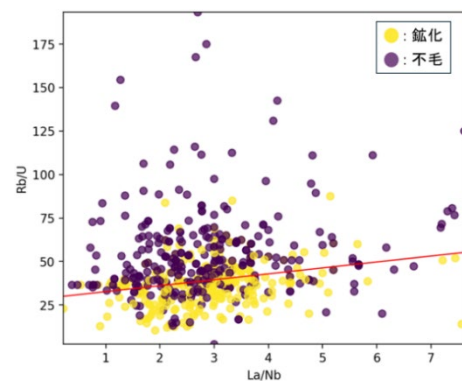
文 献

- Foley, S. F., Barth, M. G. and Jenner, G. A. (2000) Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 64, no. 5, pp. 933-938.
- 石原舜三 (2002) 鉍化花崗岩特性(I): 西南日本内帯のモリブデンとタングステン鉍床生成区。地質調査所研究報告, vol. 53, no. 9-10, pp. 657-672.
- Kay, S. M., Mpodozis, C. and Gardeweg, M. (2013) Magma sources and tectonic setting of Central Andean andesites (25.5-28°S) related to crustal thickening, forearc subduction erosion and delamination. *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 385, pp. 304-334.
- Pearce, J. A. and Cann, J. R. (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 290-300.
- Selman, C., Marris, J. and Retamales Burford, V. (2023) Chile and Peru's copper for energy transition. *S&P Global Market Intelligence*. (accessed 14 May 2026).

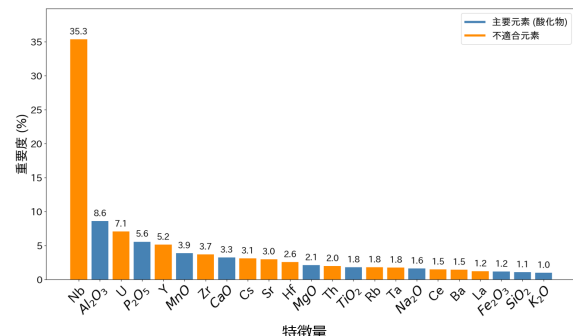
Watari, T., Nansai, K. and Nakajima, K. (2021) Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 164, 105107.



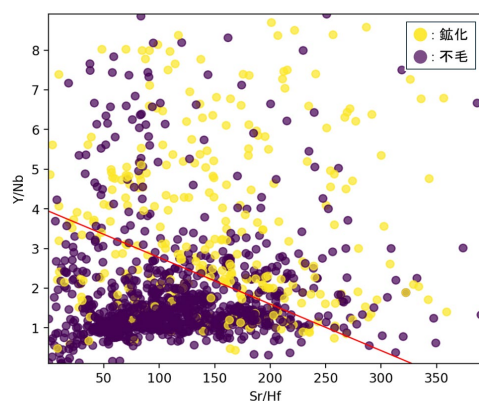
第1図 日本の花崗岩類データを用いた GBDT による特徴量の重要度



第2図 日本の花崗岩類データを用いた 鉍化/不毛花崗岩類における La/Nb と Rb/U の関係の比較



第3図 中央アンデスの安山岩類データを用いた GBDT による特徴量の重要度



第4図 中央アンデスの安山岩類データを用いた 鉍化/不毛安山岩類における Sr/Hf と Y/Nb の関係の比較